中華農業氣象 (Chinese J. Agromet.)　4(1): 1-10, 1997

專題論述 (Opinion and Review)

輻射光譜及紅外線熱像技術在農作物生產上之應用

楊純明

臺灣省農業試驗所農藝系

摘　　要

以人為中心的環境定義泛指孕育及影響人類生存、健康與生活在內的所有具有生命及無生命的空間和物質，農業的生產環境因加上其他與農業生產有關的有形和無形的資材及資材和環境的交感，而增加了空間與時間的複雜度與不安定度。就農作物生產而言，由於作物在生育過程中經常遭遇或發生各種生物性及非生物性的逆境，因此最大產量往往達不到其遺傳潛能。為了維持或延續適量(或一可接受量)的作物生產，確有必要採行任何可行方法與措施來調節作物生長狀況，並減少或降低逆境的負面效應。環境的構成因素相當複雜，環境事件非常的繁複，擬加以研究必須採以科學的方法，而輻射光譜及紅外線熱像技術提供了工具的選擇。本文將著重於農業生產上的闡述，尤其是農作物的生產，期以傳播有關遙感探測技術的實用功能，特別是輻射光譜及紅外線熱像技術的實用價值，而能推廣、擴大應用於各種農業活動及自源資源探測等之考量。

關鍵詞： 輻射光譜、紅外線熱像、遙感探測、農作物生產、逆境、電磁能。

Applications of Spectroradiometry and Infrared Thermal Imagery Techniques on Agricultural Production

Chwen-Ming Yang (Department of Agronomy, Taiwan Agricultural Research Institute, Taichung, Taiwan, ROC)

ABSTRACT: From the center of human being, the **Environment** is comprised of every animate and inanimate influence which bears upon him, his life, health and livelihood. The environment of agricultural production is more complicated by the addition of the materials put into cultivation system through man, and the temporal and spatial variations. For crop production, maximaum yield can hardly be reached to genetic potential since many stress envrionment will be encountered during growing period. It is therefore necessary to take any appropriate means to prevent or reduce the negative effects of stresses and the adjustment strategies to improve plant growth. The constituents of a crop production envrionment are complex even studied with scientific methodologies. Spectroradiometry and infrared thermal imagery techniques are among means of choice. This paper describes and evaluates the functions and applications of remote sensing, especially the values and usefulness in using these two techniques.

Key words: Spectroradiometry, Infrared thermal imagery, Remote sensing, Crop production, Stress environment, Electromagnetic energy.

前　　言

一、為何探索與探討環境？

環境 (Environment)，若以人為中心廣義來說，是泛指孕育及影響人類生存、健康與生活在內的所有具有生命及無生命的空間和物質 (Barrett and Cutis, 1982)。

收到稿件 (Received)：23 Jan. 1997.
接受刊登 (Accepted)：15 Feb. 1997.

具體的說，環境包括物理環境 (physical environment) 及生物 (living things) 兩大部份。知道了環境的定義和內涵，也就明白了為何要研究環境、瞭解環境、及保護環境的道理。農業的生產環境，則需要加上其他與農業生產有關的有形及無形的資材，還有這些資材與環境的交感，因此增加了空間與時間的複雜度與不安定度。就農作物生產而言，由於作物在生育過程中經常遭遇或發生各種生物性及非生物性的逆境，因此最大產量往往達不到其遺傳潛能。為了維持或延續適量(或一可接受量)的作物生產，確有必要採行任何可行方法與措施來調節作物生長狀況，並減少或降低逆境的負面效應 (Inoue, 1990)。欲達到此一目的的首要工作，就是認識環境，探索與探討各項環境事件的原由始末。如此，才能利用因探索與探討環境事件所獲得的發現、經驗、及成果，來(1)預備與執行環境和自然資源的管理，(2)規劃與發展及調節與改善環境的未來計畫，及(3)預測人類難以控制的環境事件的變化與演進 (Barrett and Cutis, 1982)。

二、環境評估的系列過程

環境的構成因素相當複雜，環境事件非常的繁複，若擬加以研究必須採以科學的方法(雖然環境本身是藝術的結晶)。Barrett 和 Curtis (1982) 建議這樣的步驟：(1)篩選出重要環境事件的型式、結構、及過程，(2)觀察與確認此一環境事件眞實狀況，(3)記錄此一環境事件的時空分佈，(4)分析、評估此分佈的表現及與其他環境事件的交感，最後(5)嘗試去瞭解此一環境事件的本質、形成原因、及與其他環境事件的關係。經由這系列過程的評估，吾人可以深入的瞭解環境事件，進而描繪出環境的輪廓來。那麼，如何去、怎麼去探索與探討呢？

遙感探測

探索與探討環境需要有方法，合適的方法。大別來說，有接觸式的方法 (in situ sensing) 與遙測式的方法 (remote sensing) 兩種。前者是將測定儀器設備置於被測物中(內)，〝接觸〞到被測物；後者係間隔距離來檢(偵)測被測物。遙測或稱遙感探測，因為被測物與儀器設備之間存有空間，所以通常需要組成一遙感探測系統。將觀察到的資訊以物理方法，透過媒介與中央處理器(中心)連結，並多以自動化的型態傳達、收取。一般言，遙感探測方法累積的資料遠多於接觸方法，常需要藉助高效率的處理器材與分析工具，因此電腦是不可或缺的，適當的軟體是必備的。

一、遙測與遙測系統

雖然遙測測值因環境的干擾有其先天上的限制，另具有資料量大、物理性而無化學性測定、資料解析度受限、及組件衰退等缺點，同時必需發展特定解析技術及資料展現型式以為配合，但是隨著硬體科技的進步及軟體的改良，今日的遙測準確性及精確性已顯著提高。相對的，遙測系統具有若干傳統方法所沒有的優點，以天氣的檢(偵)測為例至少有以下六點：(1)儀器設備勿須擱至被測介質中(內)即可測定，(2)遙測系統不影響被測參數原始狀況，(3)高度自動化特性，(4)可對大氣做二度乃至三度空間的掃描，(5)可檢(偵)測傳統測定方法難以捉摸或較精緻的參數並予直接輸出，及(6)在時空上具相當程度的解析度。由於完備的遙測系統多以電腦進行自動化作業，亦能夠持續地接收與整理所測定的資料，時效掌握頗佳。

遙感探測可以在三種不同的作業平臺操作，即地面觀測 (ground observation platform)、飛行器航空觀測 (airborne observation platform)、及太空觀測 (spaceborne observation platform)。後者包括衛星、太空梭及太空站等的觀測。不同的作業平臺各有其優缺點與限制，也各有其應用的範圍與價值。一般來說，地面遙感探測是航測及太空遙測的基本，建立起被測物的基本(礎)資料庫。以輻射光譜為例而言，農作物的地面光譜資料庫建立之後，才能更為精確的判讀、解析航測

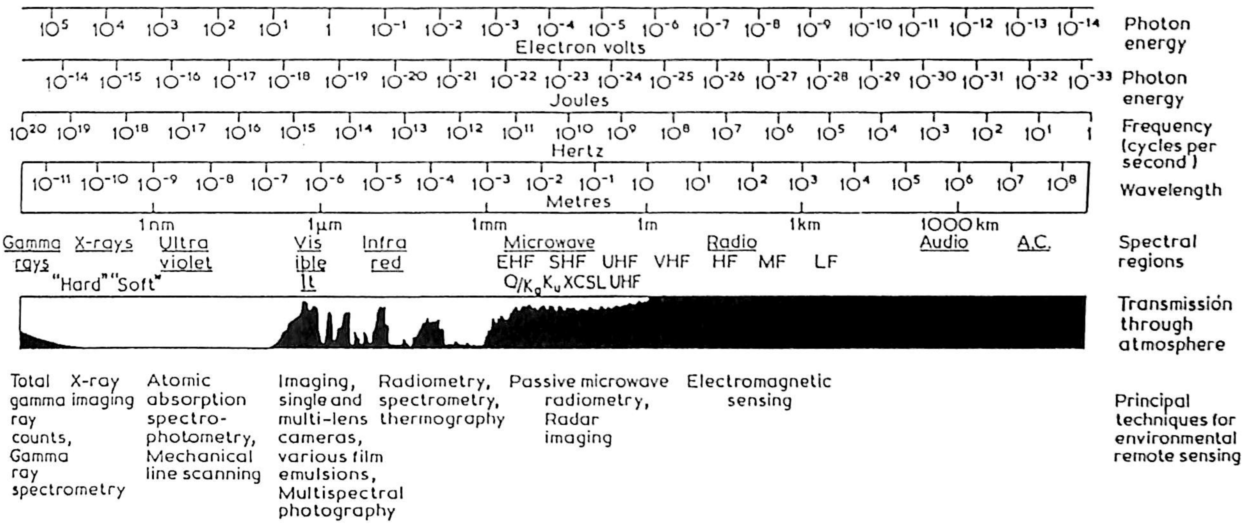

Fig. 1. The spectrum of electromagnetic radiation.(from Barrett and Curtis, 1982)

及太空遙測收取的影像光譜。地面遙測可以在田間及實驗室進行，提供被測物基礎物理特性及被測物與儀器設備間交感的資料，同時亦能從事其他地面遙測試驗研究。常見的地面遙測研究有兩類，其一爲實驗室內的物體反射及放射光譜的測定，其二爲物體或環境事件在不同環境狀況下的光譜特徵曲線檢(偵)測。

現在遙感探測技術已被廣泛應用於許多產業的日常運轉，如農業、交通運輸業、土木營造業、公共事業(電力、瓦斯、自來水等)、化工業等經濟性活動，甚至於航空、醫學、軍事、氣象等多樣化的層面。本文將著重於農業生產上的闡述，尤其是農作物的生產，期以傳播予社會大衆有關遙感探測技術的實用功能，特別是輻射光譜及紅外線熱像技術的實用價值。並提供農政機關及研究單位此一特殊科技資訊，而能酌予推廣、擴大應用於各種農業活動及自源資源探測等之考量。

二、遙測資料(訊)

遙測所觀察到的資料係以(1)電磁能(electromagnetic energy)，(2)聲(音)波(acoustic waves)，及/或(3)力場(force fields)等物理方法連接與傳達，再經適當的資料轉換、整理與分析後呈現(或還原)被測物或環境事件的原貌。以電磁能傳遞遙測資訊是最常用的一種，快速、正確、而勿須藉助傳導介質，更重要的是可以同時長距離傳遞大量的資料而不改變其本質。認識電磁能之前需先定義何謂『能』？能或稱能量，具有做工的能力，可以不同的形式(如化學能、電能、熱能、機械能、輻射(光)能等)存在，並且在做工的過程中被傳遞。一般物理書籍如此描寫，能量傳遞方式分爲三類：(1)藉著分子或原子碰撞的傳導(conduction)，(2)藉著物體磨擦、移動的物理性對流(convection)，及(3)藉著電磁能通過介質或眞空的光輻射(radiation)。凡物體溫度高於絕對零度(-273℃)者，其能量即可以光輻射(即電磁能)的形式釋出或放射，故可稱爲電磁能源(electromagnetic source)或輻射體(radiator)。無論是自然的或人工的輻射體，其輻射的類別不外以下三種：(1)連續性波長的寬波段幅射，(2)連續性波長的窄波段或單一波段的輻射，及(3)單一波長的輻射(Barrett and Curtis, 1982)。

科學家發現電磁能輻射(光輻射)具有一些重要特徵，而發展出光波模式(wave model)及光子模式(particle model)來解釋。簡單的說，光輻射以光波的形式直線

86.6.20 期刊

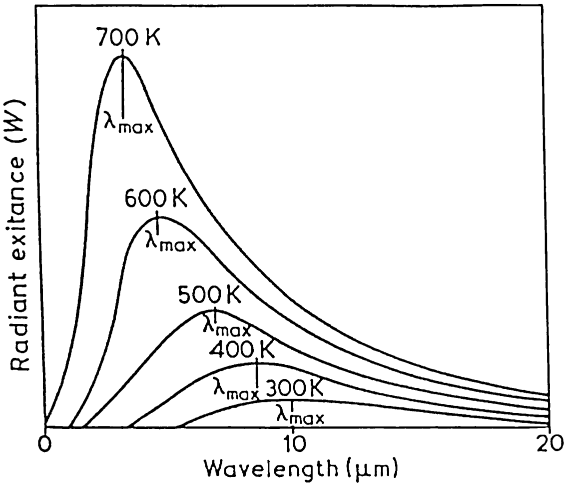

Fig. 2. Changes of blackbody emission with temperature.(from Barrett and Curtis, 1982)。

前進，光速 (3×10^{-8} ms^{-1}) 不變而波長 (wavelength) 與頻率 (frequency) 成反比；光輻射由帶有能量的光子束 (quantum 或 photon) 組成，光能與頻率成正比而與波長成反比。圖 1 爲一電磁能輻射光譜，以波長或頻率而言都非常的寬廣，光能分佈差異亦甚大，端視能量 (溫度) 的高低而定。人眼所能見到的僅僅一小部份，稱爲可見光 (visible light)，所涵蓋的波長稱爲可見光波段 (visible spectrum)，約在 0.4 ～ 0.7 μm 之間，依人眼色譜可概別爲紅 (red)、橙 (orange)、黃 (yellow)、綠 (green)、藍 (blue)、靛 (indigo)、紫 (violet) 等七波段。

三、電磁能輻射的本質與性質

爲充份利用電磁能輻射於環境的探索與探討，必先瞭解電磁能輻射的本質 (nature) 與性質 (properties)。首先，需要認識黑體 (blackbody)，熟知黑體與灰體 (greybody) 的差異。黑體係一理想的光輻射體，能完全吸收照射至體表的所有光輻射，也能放射出體表溫度所涵蓋所有波長的光輻射。此一理想的光輻射物體釋放的能量被發現近似於其體表絕對溫度的四次方函數，並被描述爲史蒂芬定律 (Stefan's Law) 或是史蒂芬－波茲曼定率 (Stefan-Boltzmann's Law)：

$$W_b = sT^4$$

其中 Wb 爲黑體所能放射出的最大輻射能，T 爲黑體體表的絕對溫度，s 爲史蒂芬－波茲曼常數(5.67×10^{-8} $Wm^{-2}K^{-4}$)。體溫高的黑體所涵蓋的波段大於溫度低的黑體，所釋放出的能量亦較高。

然而，目前大自然界尚未發現眞正黑體存在，自然物體概爲灰體，無法如黑體般理想的吸收與放射所有的光輻射。可考夫定律 (Kirchhof's Law) 乃定義輻射體的放射率 (emissivity, ε)，即輻射體實際放射出的輻射能 (W) 與其同質理想黑體釋放出的輻射能 (Wb) 的比值 (率)：

$$\varepsilon = W/W_b$$

由於灰體釋出的輻射能低於同質黑體的輻射能，因此灰體的放射率小於 1。灰體中金屬物體的放射率較低，例如光亮的鋁約 0.04，光亮的銅約 0.02；植體的放射率較高，例如平的橡木約 0.89 (請參見楊，1994b)。

輻射體放射出的光波涵蓋不同的波長，其波段的寬窄視輻射體的溫度而定，溫度高則波段寬，且呈現連續性偏歪分佈。此一分佈的最高輻射值的波長 (λmax) 可由韋恩定律 (Wien's Law) 估算：

$$\lambda_{max} = 2897/T$$

其中 T 爲輻射體的絕對溫度，λmax 單位爲 nm。輻射體的溫度升高，釋出的輻射能也愈高，λmax 的波長就愈短。如圖 2 所示，溫度爲 400K 之輻射曲線涵蓋的波段大於溫度爲 300K 者，且其最高輻射值的波長較短。

在輻射體放射出的波長分佈中，每一波長的能量均可能不一致。普朗克定律 (Planck's Law) 乃用於估算各波長的輻射能及分佈：

$$W_\lambda = 2\pi hc^2\lambda^{-5}/(e^{hc/\lambda kT} - 1)$$

其中 W_λ 爲波長 λ 單位時間至一單位面積的輻射能，h 爲普朗克常數 (6.626×10^{-34} J s)，c 爲光速 (3×10^{8} $m\ s^{-1}$)，e 爲自然對數，k 爲波茲曼常數 (1.38×10^{-23} $J\ ^{\circ}K^{-1}$)，T 爲輻射體的絕對溫度 ($^{\circ}$K)。

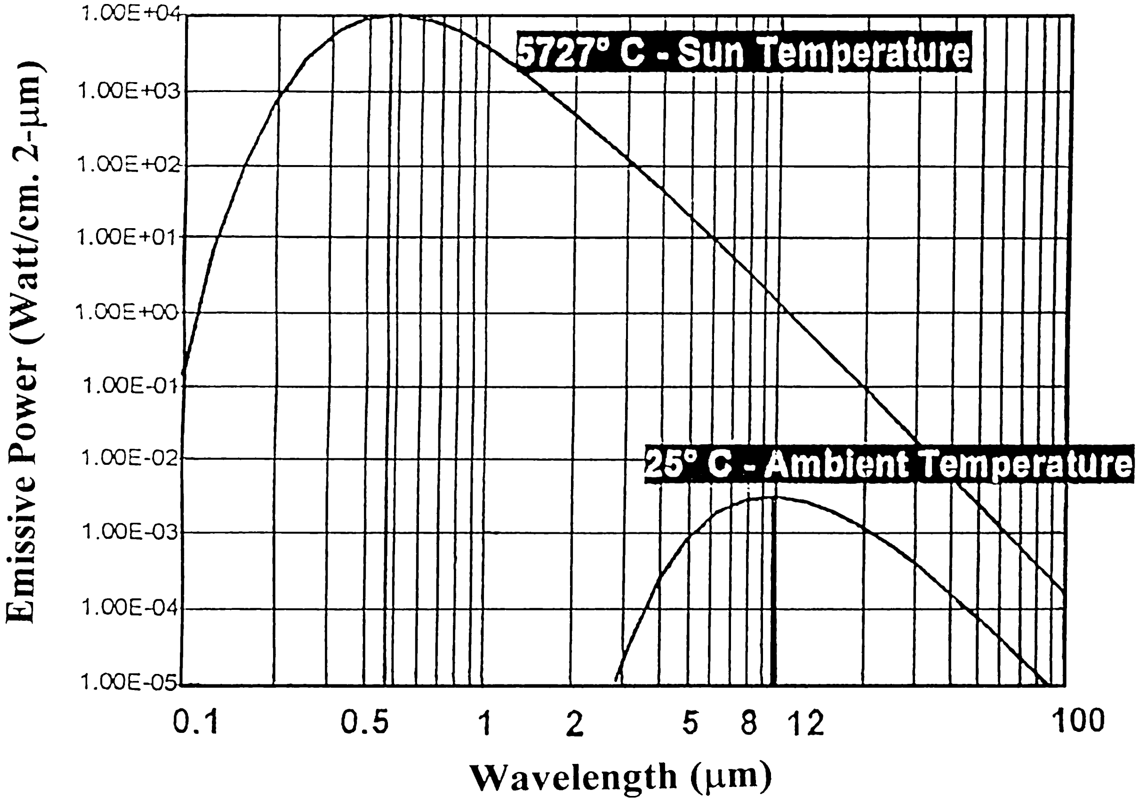

Fig. 3. Planck's blackbody radiation law.

此定律並可估算兩波長之間的波段輻射能，又可用於描繪某特定溫度輻射體的波長與其輻射能之關係，即本文後述的光譜特徵曲線。圖 3 爲利用普朗克定律計算出 25 ℃氣溫及 5727 ℃太陽表面溫度的光譜特徵曲線，25 ℃的最高輻射值波長在紅外線波段，5727 ℃則在綠光波段。

四、環境的干擾

太陽的光輻射穿透大氣層抵達海平面時，將因大氣層中氣體分子及浮塵粒子的吸收、反射、及折射等效應而衰變，如大氣層中的氣體分子如氧氣、臭氧、二氧化碳、水蒸汽等各有不同吸收波段，對太陽光輻射的吸收互異；實驗發現，氧氣 (O_2) 與臭氧 (O_3) 的最大吸收波長小於 0.3 μm，其次爲 0.32 ～ 0.36 μm；二氧化碳 (CO_2) 的最大吸收波長爲 15 μm，其次爲 10 μm 及小於 4 μm；水蒸汽 (H_2O) 具有寬廣的吸收波段 0.7 ～ 8.0 μm，尤以 6 μm 爲最大 (Fleagle and Businger, 1963)。其他主要的氣體分子如甲烷 (CH_4)、氧化氮 (N_2O) 等，亦各有其主要吸收波長 (圖 4)。大致言，海平面上所實測得的太陽光輻射，波長多短於 4.0 μm，通常被稱爲短波輻射 (shortwave radiation)。溫度遠低於太陽的地球，其放射出的輻射波長在 4.0 ～ 40 μm 之間，通常被稱爲長波輻射 (longwave radiation)。因爲大氣層組成因子的干擾，兩者之間絕大部份波長並未重疊，不似圖 3 所示。

除了大氣層組成因子，地面上檢 (偵) 測到的輻射光譜或電磁能亦受到另三項因子的影響：(1)時間性差異 (temporal variations)，如一天當中的不同時段及一年當中的不同季節等；(2)地域性差異，如緯度、經度、及海拔高度等；(3)被測物狀況，如被測物的性質及與環境的交感等的差別 (Barrett and Curtis, 1982)。

五、光譜指紋 (spectral signature) 及光譜特徵曲線 (spectral characteristics curve)

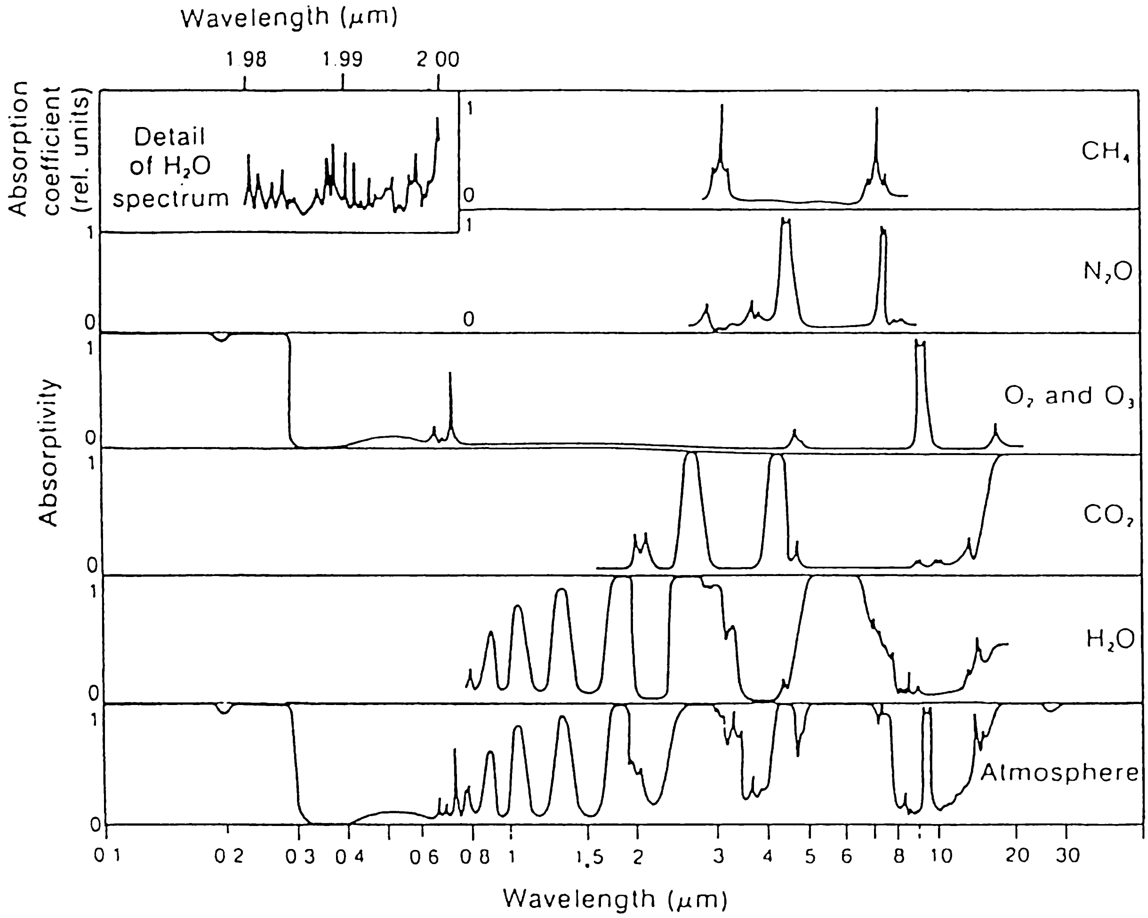

Fig. 4. The absorptivity spectra of atmospheric constituents.(from Fleagle and Businger, 1963)

利用電磁能輻射的特性，科學家研發出四類獨特的檢(偵)測器(sensors)以分別感受可見光波段、紅外線波段、微波波段(microwave)、及雷射雷達波段(laser radar-active，從 ultraviolet 至 near infrared)於遙感探測。並依波段的寬窄與數目，發展四種不同功能的檢(偵)測儀器設備：(1)連續性波長的寬波段(broad waveband)，(2)連續性波長的窄波段(narrow waveband)或單一波長，(3)雙波段(bispectra)，及(4)多波段(multispectra)。因此，遙感探測技術可分為四大項：(1)航空照像(aerial photographic surveys)，(2)多色層光譜遙測(multispectral sensing)，(3)雷達遙測(radar sensing)，及(4)熱紅外線遙測(thermal infrared sensing)。本文所提輻射光譜技術主要乃檢(偵)測電磁能輻射的紫外光、可見光及紅外線波段，紅外線熱像技術係檢(偵)測熱紅外線波段。

輻射體電磁能輻射的波長與輻射強度關係即為其光譜特徵，所描繪出的關係曲線稱為光譜特徵曲線或稱光譜指紋。如前述，任何溫度高於絕對零度的物體皆為輻射體，都具有光譜指紋。但是光譜指紋受到溫度及環境的影響，惟在特定的環境及固定的溫度下有其獨特的光譜指紋。利用此一性質，吾人可據以判斷、區分出輻射體的種類，亦可評估、分析輻射體的特性及遭受環境的影響。

以輻射光譜儀(spectroradiometer)檢(偵)測輻射體釋放出的電磁能(光輻射)，追蹤電磁能隨時空的變化，即可探索與探討輻射體在環境中的表現，研究輻射體與

環境的關係。此輻射體若爲農作物，那麼就能觀察農作物的生產表現，有機會及時採行因應調整措施與策略，預防、避免或降低逆境的危害。以紅外線熱像儀(infrared thermal imaging radiometer)檢(偵)測輻射體釋放出的熱紅外線波段，監視紅外線的改變與趨勢，可估測輻射體溫度變異。若爲農作物，可觀察農作物的點、線、面的溫度變化，推測環境對農作物的影響。

環境的探索與探討

遙感探測技術可應用於環境的探索與探討，Barrett 和 Curtis(1982) 曾予分門別類爲(1)日常天氣的分析與預測，(2)全球氣候的追蹤與演變，(3)水的循環與水資源的探測，(4)土壤與地形，(5)岩石與礦物資源，(6)生態、水土保持、及自然資源管理，(7)作物與土地利用，(8)建築工程與環境，以及(9)災難與災害偵測等九大項。本文綜以土地利用與地面覆蓋物的檢(偵)測爲例，即可列舉遙測技術多樣的應用層面(Anderson *et al.*, 1976)。例如在城市及建築地，可用於區分建築類別、綠地、公共設施、產業混雜地域等。在農用地，可予判別作物及牧場的種類與面積、作物的生長狀況、放牧牲畜的營運、林地經營等。在水源管理上，則可利用於河川、湖泊、水庫的調查、水域的分佈、海灣的動態、水源的開發。此外，其他諸如草原、苔原、原始林、濕地、荒廢地、雪地等之活動與管理均可充份應用遙測技術，獲得實際的成效。

一、農業生產系統之遙測

農業生產是一繁複的過程，農、林、漁、牧各不相同，各有其專業領域，本文僅以陳述農作物生產部份爲例。農作物的生產從種子播種(或種苗插植)、生長、發育、直到收穫物的採收與調製等，需經過一連串栽培與管理過程，每一環節各有其固有與特有的程序，惟皆受到環境的影響。當作物生長於田間時，爲了要瞭解其生長狀態(如生長特徵、生育進展、逆境爲害等)，需要經常的取樣、調查。傳統的方式爲破壞性的取樣，定期至現地某地點割(挖)取若干植株，經繁雜的處理手續與統計分析後得到需要的資料，以取樣點資料代表整個田區。結果固甚準確，過程卻費力耗時，很多時候難以爲之。相對的，輻射光譜及紅外線熱像技術爲非破壞性的遙測方法，能即時又大面積的檢(偵)測作物，經自動化系統快速的處理、分析大量資料，並立即輸出測定結果，擁有新、速、明、確特性。

二、輻射光譜技術的應用

輻射光譜技術著眼於作物本身及作物覆蓋的反射光譜分析，以追蹤作物的生育、對逆境的反應、及因應的徵狀，從而瞭解作物整體的表現與逆境造成的效應。在地面遙測上，此一技術利用輻射光譜儀測定入射光之光譜特徵曲線(光譜指紋)，分析入射光之不同波長(或波段)之光輻射強度，經配合預先建立之被測物光譜圖譜(或稱資料庫)，以判斷、區分、及評估被測物之種類、性質及當時狀況。在農業生產上的應用極廣，如各種農業災害所造成農作物的損失估計(包括受災範圍與受害程度)；農業氣象上檢(偵)測農作物受到氣象環境的影響；作物逆境研究上檢(偵)測逆境種類、範圍與程度及農作物的反應；土壤學上區分農田種類及外在環境造成的改變等。

由於環境與環境物件隨時空而異，因此輻射光譜的測定宜在相類似的背景進行，以利比較、分析。以農作物而言，因作物隨著生育的進展，植株大小、顏色、株型、及幾何排列與分佈皆隨之改變，故建立作物全生育期的輻射光譜是必需的，以此作爲基本資料庫(基礎圖譜)與判斷的基準。其次，作物對不同的逆境與不等的逆境程度反應不一，呈現的特徵波段或有不同，變化趨勢各異，倘能收集各種逆境下的光譜，應用的層面將更加擴大。

輻射光譜技術在農業生產上的應用實例甚多，因爲作物植冠或葉片的反射光譜受到作物形態、生理、生化、及幾何分佈

等的影響。Curtis (1978) 曾觀察春大麥植冠及土壤可見光反射率的改變，以追蹤作物的生長演進及覆蓋形成的歧異。Leeman 等 (1971) 早在七十年代即以輻射光譜特徵判別作物的種類，Sinclair 等 (1971) 觀測多種旱作物植冠可見光及紅外光的變化趨勢，配合葉片水分含量的測定，以評斷缺水對光譜的影響。MacDonald 等 (1973) 比對可見光影像、多波段掃描光譜、及田間實測值，以比較各種方法評估玉米葉片罹患南方枯萎病 (southern corn leaf blight) 的精確性。Thomas 和 Oerther(1972) 試以甜椒葉片反射率估測含氮量，發現與傳統 Kjeldahl 法測值僅 0.7 %差異。作者 (1996, 未發表資料) 曾以輻射光譜儀檢 (偵) 測臺灣省種苗繁殖改良場溫室光照，以協助釐清溫室內、外光輻射的差異。蘇及楊 (1996b) 發現作物族群植冠輻射光譜的反射比，可區分矮性菜豆、水稻、落花生、及大豆的差異。作者曾在臺灣省農業試驗所農場長期偵測水稻全生育期族群植冠的輻射光譜，描繪出一、二期稻作各波長反射率的生育演變，並分析出各波段的變化趨勢 (資料未列出)。

三、紅外線熱像技術的應用

紅外線熱像技術係利用紅外線熱像儀測定物件 (如農作物) 及環境影像之熱紅外線 (如 8 ～ 12μm 或 3 ～ 5μm) 與其強度，運用影像轉換技術將此測得之紅外線以溫度影像呈現，以瞭解被測物件及環境之溫度高低與分佈 (其中溫度係以所測得紅外線來計算)，包括分析、估算、及預測被測物之體表溫度與未來溫度演變趨勢。測值再經比對正常狀況時被測物體表之溫度與分佈，便可瞭解被測物之異常程度與範圍。因此，凡具有溫度或作業過程中產生、消耗、或傳導熱 (量) 的系統，均適用紅外線熱像技術予測溫。

一般紅外線熱像系統係利用紅外線的長波段區 (8 ～ 12μm)，以避免強日照反射及高濕度的干擾，提供較高解析度影像；3 ～ 5 μm 短波段紅外線則多利用於無直接日照干擾環境的高溫測定 (楊， 1994a)。高性能紅外線熱像系統的設計採用以下特點：(1)具有高速掃描功能，(2)具有高空間解析度，(3)具有準確的溫度測值，(4)具有清晰、一致的影像顯示，(5)能在各種環境下進行溫度測定，(6)屬於非破壞性檢 (偵) 測，及(7)多用途之應用功能。紅外線熱像技術及輻射光譜技術單獨可從事農業生產上的試驗研究，亦可搭配進行同一研究，或配合其他遙測技術 (可見光影像及微波雷達等)，增進測定品質、獲得更明確而具體的結果。

由於紅外線熱像技術具有監視辨識、遙控偵測、及非破壞檢測等功能，如前述已被廣泛應用於如光化學物理、工程、電子、機械、醫學、軍事、及農學等研究領域及工業系統。在農學或農業生產系統上，無論是乾旱造成植株溫度的改變、病蟲害感染作物植株後引發的組織色變與溫度升降、植物生理的熱傳導、或是某種逆境狀況引起作物族群的大規模溫度變異，均可以紅外線熱像技術進行探討、研究 (楊， 1994a)。然仍由於作物隨著生育的進展，生理及形態殊異，亦須建立多樣的熱像資料庫作爲定性與定量的比較。

文獻上紅外線熱像技術應用在農業生產之實例亦甚多，如 O'Toole 等 (1984) 以紅外線溫測作物族群溫度而發展出作物水分逆境指數 (crop water stress index)，能夠適切的評估作物缺水逆境的程度；Inoue (1986, 1990) 以紅外線熱像觀察作物族群溫度，據以顯示植冠溫度的空間分佈。Laing (1971) 檢測岩石之熱紅外線輻射值，以判別岩石種類。楊及蘇 (1996) 顯示，水稻植株因土壤缺水而升高的體溫可由紅外線熱像觀測。蘇及楊 (1996a) 搭配紅外線熱像及輻射層析光譜，綜合判斷經人工模擬酸雨淋洗的大豆及落花生株冠的反應，藉以區分酸雨造成作物外觀的徵狀差異。

結 語

輻射光譜技術係利用光輻射的波長與輻射能性質，經由檢 (偵) 測、頻譜分析、

及歸納等步驟，而判斷與區別被測物體表面的特性(楊及蘇， 1996)。以農作物言，植體表面如光滑度、透明度、顏色、突出物、及質料等特徵，作物族群植冠呈色、幾何排列、及大小分佈等狀態，決定了該作物反射光譜與輻射量的差異。藉此一技術檢(偵)測作物輻射光譜，經比對其圖譜資料庫後，可估測出作物的種類、生育階段、及生長狀況，並據以評估作物生長與環境間的交感表現，迅速明確的獲得非破壞性的檢(偵)測結果。

紅外線熱像技術在於檢(偵)測及顯示被測物之熱能(量)與溫度，將之轉化爲熱像顯示於監視螢幕，作爲溫度量化與趨勢分析等用途(楊， 1994a)。由於紅外線熱像系統可在人眼目視爲完全黑暗的環境、煙霧瀰漫的空間、或在明暗對比列極低的狀況下〝看見〞被測物，顯現被測物的熱影像，因此給予此系統相當獨特的應用彈性與使用範圍，成爲量測熱能(量)與溫度的最佳工具。〝活〞的作物因爲代謝運轉及接受外界環境的熱源而擁有體溫，〝死〞的作物(尚未腐爛前)則直接反射外界背景的熱源，所以能採用紅外線熱像技術檢(偵)測植體的溫度起伏。以熱像而非點的方式顯示體表溫度乃至周遭環境溫度及其變化，據以衡量作物的生理代謝狀態及可能發生異常的部位，得於第一時間內予以處理(置)(楊及蘇， 1996)。

誠然地，包括輻射光譜及紅外線熱像在內的遙感探測技術有其諸多的優點與應用，畢竟生物是複雜的、環境是渾沌的，宇宙的奧妙及大自然的神奇仍然是人們所〝無能〞完全理解的，當然也〝無法〞百分之百精確與準確的瞭解環境事件和環境。人生活在環境中，環境與環環事件的探索與探討是必需的，而輻射光譜及紅外線熱像技術提供了工具的選擇。

誌　謝

本文部份內容曾發表於中華農業氣象學會八十五年年會專題演講中，作者謹對行政院農業委員會及臺灣省政府農林廳給予的研究計畫經費支持，表示由衷的感謝。本文編列臺灣省農業試驗所研究報告第1866號。

引用文獻

楊純明　1994a　紅外線熱像溫測技術之介紹。pp.109-113。農業氣象之研究法。楊純明、徐森雄、吳清吉、翁仁憲、申　雍　編著　中華農業氣象學會出版。

楊純明　1994b　農業氣象小百科全書：名詞介紹－黑體。中華農業氣象學會簡訊　3(2): 4-5。

楊純明、蘇慕容　1996　紅外線熱像技術及輻射光譜層析技術應用實例：水稻乾旱。技術服務季刊　28: 19-21。

蘇慕容、楊純明　1996a　輻射光譜及紅外線熱像檢(偵)測大豆及落花生對人工模擬酸雨之徵狀反應。中華農業氣象 3: 131-140。

蘇慕容、楊純明　1996b　輻射光譜層析在農業上的應用。技術服務季刊　27: 5-6。

Anderson, J. R., E. E. Hardy, J. T. Roach and R. E. Witmer. 1976. A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. US Geological Survey Professional. pp.964.

Barrett, E. C. and L. F. Curtis. 1982. Introduction to Environmental Remote Sensing. 2nd ed., Chapman and Hall, London. 352pp.

Curtis, L. F. 1978. Remote Sensing Systems for Monitoring Crops and Vegetation. Prog. Physic. Geograph. 2: 55-79.

Fleagle, R. G. and J. A. Businger. 1963. An Introduction to Atmospheric Physics. Academic Press, New York.

Inoue, Y. 1986. Remote-monitoring of the physiological and ecological status of crops. I. Analysis of thermal image of crop canopy. Japan. J. Crop Sci. 55: 261-268.

Inoue, Y. 1990. Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery. Japan. J. Crop Sci. 59: 762-768.

Laing, W. 1971. Earth resources satellites. p.69-91. In: A Guide to Earth

Satellites. D. Fishlock, ed. MacDonald, Lodon and Elsevier, New York.

Leeman, V., D. Earing, R. K. Vincent and S. Ladd. 1971. The NASA Spectral Information System: a data compilation. NASA, Houston, Texas, USA.

MacDonald, R. B., M.E. Bauer, R. D. Allen, J. W. Clifton, J. A. Erickson and D. A. Landgrebe. 1973. Results of 1971 Corn Blight Watch Experiment. Proceed. of the 8th Intl. Symp. on Remote Sensing of Environ. Ann Arbor, Michigan. 1: 157-189.

O'Toole, J. C., N. C. Turner, O. P. Namuco, M. Dingkuhn and K. A. Gomez. 1984. Comparison of some crop water stress measurement methods. Crop Sci. 24: 1121-1128.

Sinclair, T. R., R. M. Hoffer and M. M. Schreiber. 1971. Reflectance and internal structure of leaves from several crops during a growing season. Agron. J. 63: 864-868.

Thomas, J. R. and G. F. Oerther. 1972. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements. Agron. J. 64: 13.